



PREGLED POSTOJEĆIH ZAŠTITA VETROGENERATORA SA DVOSMERNOM NAPAĀANOM ASINHRONOM MAŠINOM I NJIHOVE PODRŠKE STABILNOSTI SISTEMA TOKOM KRATKOG SPOJA

OVEREVIEW OF EXISTING FAULT PROTECTIONS OF WIND POWER PLANTS WITH DOUBLY FED INDUCTION MACHINES AND THEIR INFLUENCE ON MODELING DURING SHORT CIRCUIT FAULTS IN THE SYSTEM

ANDRIJA MITROVIĆ, Schneider Electric, Novi Sad, R. Srbija
LUKA STREZOSKI, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za Energetiku, elektroniku i telekomunikacije, Novi Sad, R. Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Broj vetroelektrana je u naglom porastu zbog povećane potražnje za električnom energijom iz obnovljivih izvora. Rastom broja vetroelektrana raste i njihov udeo u ukupno proizvedenoj električnoj energiji, što dovodi u pitanje robustnost i stabilnost elektrosistema, kao i način modelovanja u elektroenergetskim proračunima. Dvosmerno napajane asinhronne mašine, zbog svojih prednosti u proizvodnji električne energije pri promenljivim brzinama, se najčešće koriste kao generatori u vetroelektranama. Kod ovih mašina rotor je na mrežu priključen preko konvertera, a stator direktno. Zbog direktne konekcije statora na mrežu ove mašine su osetljive na nagle promene napona na njenim priključcima, te pad napona tokom kvara u mreži može da dovede do naglog povećanja struja na statoru dvosmerno napajane asinhronne mašine, a zbog elektromagnetne konekcije i do rasta vrednosti napona i struja na rotoru. Ove vrednosti napona i struja na rotoru mogu da oštete konverter ukoliko prekorače njegove dozvoljene vrednosti. Stoga su se dvosmerno napajane asinhronne mašine u prošlosti isključivane sa mreže tokom kratkog spoja. Ovo je danas neprihvatljivo s obzirom da bi u mrežama gde je udeo u proizvodnji električne energije iz ovih izvora veliki ovo dovelo do još većeg narušavanja stabilnosti sistema. Zbog toga, operateri zahtevaju da ove mašine podržavaju "fault ride through" ili "low voltage ride through" zahteve, što znači da moraju ostati povezane na mrežu tokom kvara kako bi pomogle u održavanju stabilnosti. Ovaj rad predstavlja pregled tehnika koje su razvijene kako bi se ovim generatorima omogućilo da ostanu povezani na sistem i podrže ga tokom perioda naponske nestabilnosti.

Ključne reči: Dvosmerno napajana asinhronna mašina, fault ride through, low voltage ride through, vetroelektrana, stabilnost elektroenergetskog sistema, kvarovi u mreži

SUMMARY

With constant increase in the number of wind power plants and thus their penetration in power production, system robustness and stability become of interest. Due to their advantages, doubly fed inductions machines are mainly in use as generating units in wind power plants. While rotor windings are connected to the grid over power converters, stator windings are directly connected to the grid and thus these generating units are highly sensitive to voltage disturbances. Voltage drops during faults lead to high voltages and currents on rotor side due electromagnetic coupling between stator and rotor. These voltages and currents can damage expensive power electronics on the rotor side. In the past, to save the equipment, wind power plants with doubly fed induction machines have been disconnected from the grid during faults which is unacceptable today when the number of these plants is considered. Grid operators require from these types of power sources to have fault ride through or low voltage ride through capabilities to support the grid during low voltage periods. This paper presents an overview of some of the numerous techniques developed to enable fault ride through for doubly fed induction machines, and the influence of these techniques on the modeling in short circuit computations.

Key words: Doubly Fed Induction Machine, fault ride through, low voltage ride through, wind turbine, power system stability, power system faults

UVOD

Konstantan rast potrošnje, ograničene količine energenata fosilnog porekla, kao i potražnja za čistom proizvodnjom energije predstavljaju osnovne razloge za razvoj elektrana na obnovljive izvore energije. Udeo ovih elektrana u proizvodnji beleži sve veći rast i tako iste pretenduju da postanu dominantni proizvođači električne energije [1]. Zbog toga raste i očekivanje da one predstavljaju pouzdane i stabilne izvore kao i konvencionalne elektrane (termo, hidro i nuklearne elektrane sa sinhronim mašinama kao proizvodnim jedinicama). Pored hidro i solarne energije, energija vetra predstavlja najveći izvor obnovljive energije čiji potencijal nije dovoljno iskorišten.

Promenljiva brzina vetra zahteva poseban odabir i kontrolu proizvodnih jedinica u vetroelektranama. Za generatore u vetroelektranama se najčešće koriste [2]:

1. Sinhrona mašina ("Synchronous Machine" - SM),
2. Sinhrona mašina sa permanentnim magnetima ("Permanent Magnet Synchronous Machine" - PMSM),
3. Kavezna asinhrona mašina ("Squirrel Cage Induction Machine" - SCIM),
4. Dvosmerno napajana asinhrona mašina ("Doubly Fed Induction Machine" - DFIM),
5. Asinhrona mašina bez četkica ("Brushless Doubly Fed Induction Machine" - BDFIM).

Vetroelektrane se spram brzina rada i kontrole generatora dele na četiri tipa:

1. Tip 1. – Kavezna asinhrona mašina direktno priključena na mrežu,
2. Tip 2. – Asinhrona mašina sa promenljivom otpornošću na rotoru direktno priključena na mrežu,
3. Tip 3. – Dvosmerno napajana asinhrona mašina priključena na mrežu preko konvertera,
4. Tip 4. – Generator (sinhroni ili asinhroni) koji je uređajima energetske elektronike potpuno odvojen od mreže.

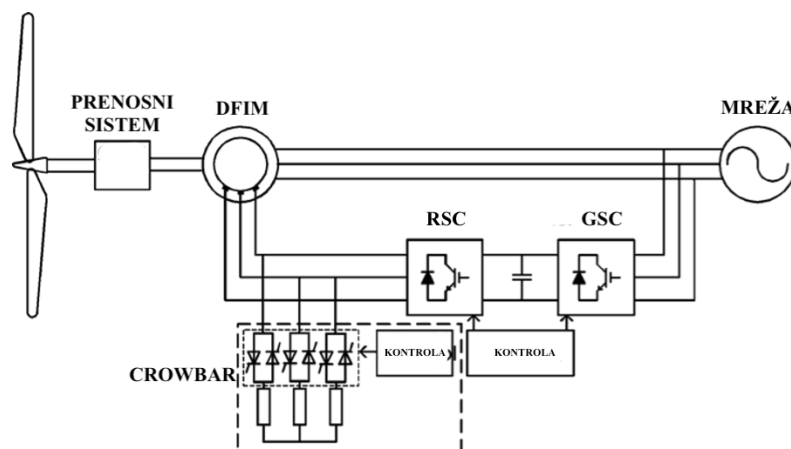
Zbog svojih prednosti u radu pri promenljivim brzinama obrtanja DFIM je najčešće korišćen tip generatora a samim tim i Tip 3. vetroelektrana. Ovi generatori su po svojoj prirodi jako osetljivi na naponske promene te kako bi se obezbedila pouzdana i stabilna proizvodnja tokom naglih promena napona na priključcima ovog generatora potrebno je uložiti u njihovu zaštitu i kontrolu. Ovaj rad daje pregled tipova zaštite DFIM i njihove kontrole tokom kratkog spoja (naglih promena napona).

Tranzicija na nepredvidljive obnovljive izvore energije, od kojih vetar predstavlja jednu od najznačajnijih, traži da se od istih obezbedi stabilna i robustna proizvodnja energije. Samim tim pregled najčešćih tehnika i poznavanje njihovog uticaja na ponašanje DFIM tokom kratkog spoja je tema ovog rada.

Rad se sastoji od devet glava. U prvoj je dat uvod, u drugoj je opisana vetroelektrana sa DFIM kao generatorom, u trećoj je dat matematički model DFIM, četvrta daje opis FRT zahteva, peta i šesta daju pregled pasivne i aktivne FRT metode respektivno, sedma daje kratku diskusiju obrađenih metoda, osma zaključak, nakon čega je dat pregled korišćene literature.

VETROELEKTRANA SA DFIM KAO GENERATOROM

Šema elektrane sa DFIM kao generatorom je prikazana na slici 1. Na ovoj šemi su prikazani najčešći elementi ovog tipa vetroelektrana [3]. To i ne znači da se u ovoj konfiguraciji ne može naći i neka dodatna oprema.



Slika 1 – Vetroelektrana sa DFIM

Sa slike 1. se može videti da je DFIM na mrežu priključena i preko statora i preko rotora. Dok je stator (najčešće) priključen na mrežu, rotor se priključuje preko elektroenergetskog konvertera. U nekim konfiguracijama konverter

se može naći i na statoru, ali tada on mora biti dimenzionisan za punu snagu generatora, dok ako se nalazi na rotoru mora biti dimenzionisan za 25–30% snage generatora. Ovo utiče na cenu konvertera te se češće koristi konverter na rotoru jer je jeftiniji.

Elektroenergetski konverter ima dva dela, prvi je konverter okrenut ka rotoru (rotor side converter – RSC), a drugi je konverter okrenut ka mreži (grid side converter – GSC). Između njih se za stabilizaciju napona nalazi sistem kondenzatora. Čitav ovaj sistem se koristi za kontrolu DFIM tokom rada, ali zbog osetljivosti DFIM na nagle naponske promene može da bude uništen usled prevelikih napona i struja na rotorskoj strani. Tokom kratkog spoja ovi naponi i struje mogu da imaju vrednosti napona i struja na statoru koje prevazilaze nominalne vrednosti konvertera na rotoru. Pored oštećenja konvertera, nesimetrični kratki spojevi mogu da dovedu do mehaničkih oštećenja (prenosnom sistemu, ležajevima, elisama ...) usled trzaja električnog momenta DFIM [4] [5]. Na slici se još vidi i set otpornika pomoću kojih se rotor može kratkospojiti i tako odvojiti konverter od rotora. Ovi otpornici ce koriste za zaštitu konvertera i predstavljaju načešći oblik zaštite poznat pod imenom kao *crowbar*. Pored *crowbara* često je u upotrebi i čoper kao zaštita kondenzatorskog sistema između RSC i GSC.

MATEMATIČKI MODEL DFIM

Matematički model DFIM je obrađen u velikom broju radova. Model je petog reda, sastoji se od električnog i mehaničkog podsistema [6].

Električni sistem je predstavljen sa četiri skalarne jednačine u sinhrono rotirajućem koordinatnom dq sistemu, gde je direktna komponenta napona na statoru vezana za q osu (direktna komponenta fluksa u mašini je vezana za d osu). Električni model je predstavljen jednačinama (1) – (4):

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_s \lambda_{qs}, \quad (1)$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_s \lambda_{ds}, \quad (2)$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \lambda_{qr}, \quad (3)$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \lambda_{dr}, \quad (4)$$

gde su izrazi za flukseve dati sa (5) i (6):

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}, \quad \lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}, \quad (5)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds}, \quad \lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs}. \quad (6)$$

Mehanički deo matematičkog modela je dat sa (7):

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + B \omega_r = T_{mec} - T_e. \quad (7)$$

Poznavajući napone i struje mašine do električnog momenta, kao i aktivne i reaktivne snage se dolazi pomoću sledećih relacija:

$$T_e = \frac{3 L_m}{2 L_s} (\lambda_{qs} i_{ds} - \lambda_{ds} i_{qs}), \quad (8)$$

$$P_s = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \quad (9)$$

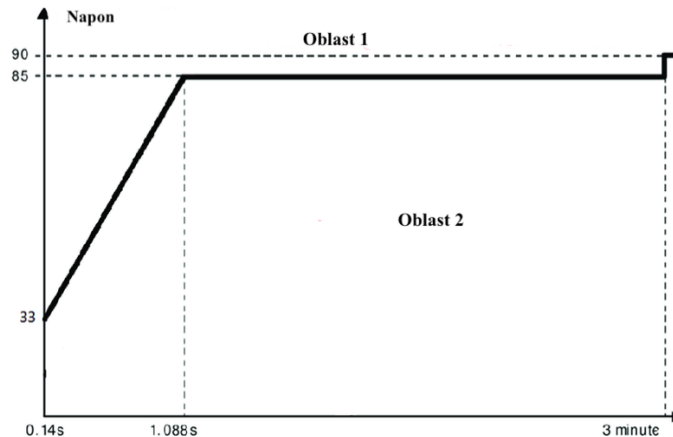
$$Q_s = v_{ds} i_{qs} - v_{qs} i_{ds}. \quad (10)$$

FAULT RIDE TROUGH ZAHTEVI

Rastom broja vetroelektrana raste i njihov udeo u proizvodnji električne energije. Zbog ovoga vetroelektrane predstavljaju jako važne elemente koji utiču na stabilnost sistema. Kao što je već pomenuto, DFIM, koje se najčešće koriste kao generatori u vetroelektranama, su jako osetljive na nagle naponske promene. Tokom kvarova u mreži, kada se desi značajna promena napona na priključcima DFIM, u DFIM dolazi do naglog porasta struja na statoru, a usled elektromagnetne veze i do porasta napona i struja na rotoru. Zbog toga što ove struje na rotoru mogu da unište skupe konvertere, vetroelektrane su se tradicionalno gasile iz mreže tokom kratkog spoja ili se

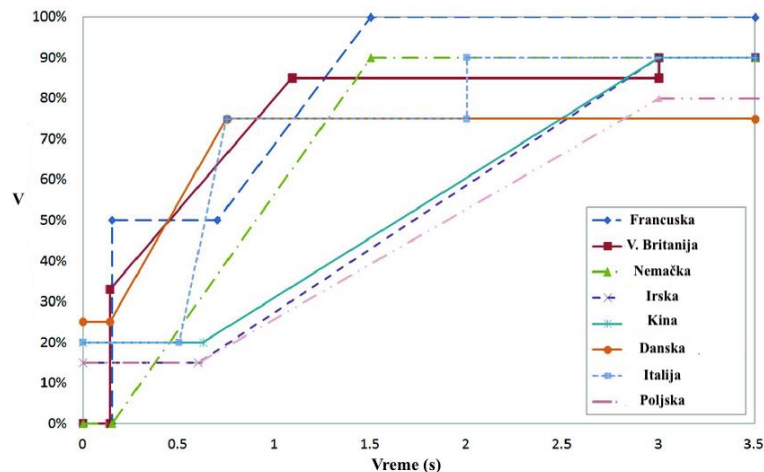
koristio *crowbar* koji bi kratko spojio namotaje rotora te bi se tada DIFM počela da ponaša kao klasična kavezna asinhrona mašina ali sa povećanom vrednosti otpornosti na rotoru što dovodi do toga da mašina povuče još veću reaktivnu energiju i tako dovede do još većeg pada napona u mreži. Danas, ovaj pristup tokom loših naponskih prilika u mreži ne može biti prihvaćen jer se gašenjem elektrana ili njihovim pretvaranjem u povećane potrošače reaktivne snage dovodi do još većeg pogoršanja naponskih prilika u mreži. Stoga mrežni operateri postavljaju posebne zahteve po kojima bi vetroelektrane (u ovom radu DFIM vetroelektrane) ostale priključene na mrežu da podrže stabilnost elektroenergetskog sistema tokom kratkog spoja. Ovi zahtevi su poznati pod imenom *Fault Ride Trough* (FRT) ili *Low Voltage Ride Trough* (LVRT) [7].

FRT daje dijagram na osnovu kojeg se određuje da li će DFIM biti isključena sa mreže tokom kratkog spoja. Primer tog dijagrama je dat na slici 2. Na dijagramu se jasno vide dve oblasti, prva u kojoj kada se nalazi radna tačka DFIM mora ostati priključen na mrežu i druga u kojoj DFIM može biti isključen sa mreže.



Slika 2 – FRT dijagram

Ovi FRT dijagrami se razlikuju u zavisnosti od FRT zahteva svake države. FRT dijagrami za različite države su dati na slici 3.



Slika 3 – FRT dijagrami za različite države

FRT za DIFM najčešće propisuje sledeće zahteve [7]:

- Zaštita konvertera RSC i GSC od oštećenja usled visokih napona i struja – držanje napona i struja na rotoru u okviru propisanih granica koje su određene nominalnim vrednostima za konvertere, a ukoliko to nije moguće odvajanje konvertera od rotora.
- Minimizacija mehaničkog stresa na rotirajuće elemente vetroelektrane tokom kratkog spoja – kontrola napona i struja DFIM kako bi se ublažila nesimetrija tokom kratkog spoja i samim tim smanjili trzaji u električnom momentu.
- Ispunjenje zahteva za podršku mreži tokom kratkog spoja injektiranjem aktivne i reaktivne snage – injektiranje propisanih vrednosti aktivne i reaktivne snage kako bi se doprinelo stabilnosti mreže (npr. Nemački propis "SDLWindV", preporučuje injektiranje minimum 2% nominalne reaktivne komponente struje direktnog redosleda za svaki procenat pada direktne komponente napona [8]).
- Ograničenje struja kratkog spoja.

Veliki broj tehnika je razvijen kako bi se ispunili prethodno navedene FRT zahteve. One se na osnovu korišćene opreme i načina kontrole iste dele na pasivne i aktivne tehnike, o kojima će biti reči i u nastavku rada.

PASIVNE FRT TEHNIKE

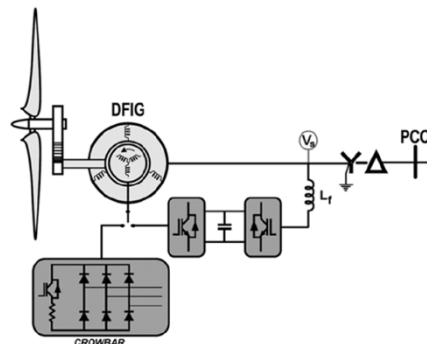
Pod pasivnim FRT tehnikama se podrazumevaju tehnike zaštite DFIM gde ugrađena dodatna oprema bez napredne kontrole reaguje na visoke napone i struje na rotoru držeći ih u dozvoljenim granicama ili odvajanjem konvertera od rotora. Ono što je karakteristično za ove tehnike je da nemaju velike mogućnosti da drže DFIM pod kontrolom tokom velikih padova napona, nego ga u većini slučajeva ostavljaju bez kontrole kako bi se sačuvali konverteri na rotoru [5].

Upravljanje uglom zakrenutosti elisa vetroelektrane

Tokom kratkog spoja na priključcima DFIM napon pada dok ulazna mehanička energija ostaje ista. Ovo dovodi do toga da struje na statoru porastu kako bi se ispoštovao bilans snaga. Ove visoke struje se elektromagnetnom spregom prenose na rotor gde mogu oštetiti skupu elektroniku. Upravljanjem ulaznom mehaničkom snagom se može preduprediti povećanje struja na statoru, te se kao jedan vid zaštite DFIM tokom kratkog spoja koristi upravljanje uglom zakrenutosti elisa kako bi se smanjila ulazna mehanička energija. Ovo ima jako ograničeno delovanje, a i nema efekta na nesimetriju kratkog spoja koja dovodi do trzaja u električnom momentu te tako opterećuje rotacione elemente [5].

Upotreba seta otpornika na rotoru - Crowbar

Crowbar predstavlja načešće korišćen oblik zaštite DFIM od kratkog spoja (slika 4.). On predstavlja set otpornika koji je u toku normalnog rada neaktivan, ali kada se desi kratak spoj rotorski namotaji se kratko spajaju preko njega tako ostavljajući RSC i GSC da vise. Modovi upotrebe *crowbar-a* tokom loših naponskih prilika su predstavljeni u [9].



Slika 4 – DFIM sa crowbar-om

Kada se *crowbar* aktivira DFIM počinje da se ponaša kao klasična kavezna asinhrona mašina sa povećanom otpornošću na rotoru. U momentu uključivanja DFIM gubi kontrolu jer je kontroler odvojen od rotorskih namotaja i istovremeno povlači reaktivnu snagu iz mreže.

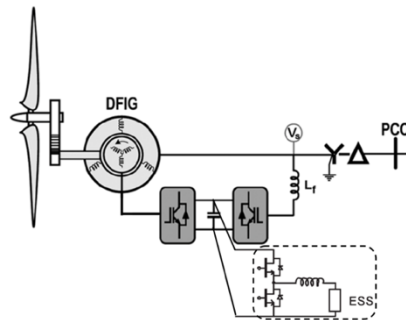
Otpornost *crowbar-a* se mora pažljivo proračunati. Previše niske vrednosti otpornosti nisu efikasne u ograničavanju visokih vrednosti tranzijentnih struja i momenta, dok previsoke vrednosti iako efikasno ograničavaju tranzijentne vrednosti dovode do visokih vrednosti rotorskih struja i momenta pri deaktiviranju *crowbar-a*. Vrednost otpornosti *crowbar-a* može i da bude 20 puta veća od rotorskih otpornosti [10].

Kako bi se prevazišli prethodno pomenuti problemi u [11] je predloženo da se *crowbar* zaštita prebaci na stator. Ovo ima svoje mane kao što su povećani gubici na statoru kao i veća cena *crowbar-a* zbog većih nominalnih napona i struja na statoru.

Upotreba kondenzatorskog sistema ili sistema za skladištenje energije na dc liku

Ovaj oblik pasivne zaštite se sastoji u tome što se na dc link između dva konvertera na rotoru doda sistem kondenzatora kao jedinica koja može da primi višak energije i tako smanji izloženost dc link-a. Očigledno je da ovaj tip zaštite samo štiti konvertere od visokih napona i nema uticaja na struje rotora. Delovanje ove zaštite je ograničeno dimenzijom samog kondenzatorskog sistema, odnosno količinom energije koju ovaj sistem može da podnese [5]. Pored kondenzatorskog sistema, na dc link se može dodati i sistem za skladištenje i disipaciju viška

energije (Energy Storage System – ESS). Ovaj sistem je prikazan na slici 5. Jasno je da su i mogućnosti ovog sistema jako ograničene, a i zbog dodatne opreme i kontrole cena sistema raste.



Slika 5 – DFIM sa ESS

AKTIVNE FRT TEHNIKE

Ove tehnike za razliku od pasivnih FRT tehnika koriste složenije načine kontrole RSC i GSC kako bi se ograničile vrednosti struja i napona na rotoru tokom kratkog spoja u mreži. Većina ovih tehnika se bazira na inektiranju struja u namotaje rotora koje smanjuju uticaj tranzijentnih promena a samim tim i aktivaciju crowbar-a ili isključenje DFIM sa mreže.

RSC kao izvor napona i struja koje negiraju uticaj kratkog spoja na rad DFIM

Veliki broj tehnika za zaštitu DFIM tokom kratkog spoja za ideju koristi iskorišćenje RSC kao izvor napona i struja koje će se suprotstaviti tranzijentnim promenama na rotoru i tako ograničiti napone i struje rotora na one koje nisu štetne za kontroler. Ove tehnike su poznate kao *feed-forward transient current control* (FFTCC). Ova tehnika zahteva precizna i brza merenja koja će indicirati rast napona i struje na rotoru, na osnovu čijih vrednosti se preračunavaju inektiranja RSC kontrolera. Pored dodatnog merenja potrebna je i dodatna modifikacija kalkulacija vezanih za upravljanje DFIM.

Tehnike koje se baziraju na FFTCC su predstavljene u [12], [13], [14], [15] i [16]. Neke od ovih tehnika prate promene napona i struja na rotoru, a neke prate promene vrednosti fluksa u magnetnom kolu mašine. Bez obzira na to koje tranzijente vrednosti se prate sve one imaju za cilj da se ublaže tranzijentni procesi u DFIM.

Upotreba dodatnih konvertera za FRT

Dodatna oprema u odnosu na onu koja je prikazana na slici 1 se može koristiti kako bi se poboljšao FRT za DFIM. U upotrebi mogu biti dodatna merenja i dodatni konverteri. Upotreba serijskog konvertera je predstavljena u [17]. Ovde konverter tokom kratkog spoja primenjuje opadajući sinusoidni napon čiji je cilj da drži vrednosti napona i struja pod kontrolom.

Dodatni konverteri na rotoru (*parallel grid-side rectifier* (PGSR) i *series grid side converter* (SGSC)) su predstavljeni u [18] i [19]. Ovi konverteri povećavaju robusnost FRT DFIM i za veće i manje brzine od sinhrono. SGSC preusmerava višak energije iz dc-linka u mrežu.

Upotreba rotacionih masa kao akumulacije za višak energije

Upotreba rotacionih masa kao akumulacije energije tokom perioda naponskih poremećaja je predstavljena u [20] i [21]. U [20] se koriste i dodatni otpornici na kojima se takođe troši višak energije. Ovaj način zaštite zahteva jako kompleksno upravljanje koje zavisi od velikog broja merenja u mašini. Adekvatnim upravljanjem ulaznom mehaničkom snagom (uglom elisa), brzinom rotacionih masa i kontrolerima na rotoru, ova metoda za FRT se pokazala kao jako efikasna za zaštitu DFIM tokom kratkog spoja.

Upotreba nelinearnih kontrolnih strategija

Sve do sad predstavljene kontrolne strategije su linearne koje su se zbog svoje jednostavnosti i niske cene našle u industrijskoj upotrebi. Linearne strategije se nisu pokazale kao dobro rešenje tokom ozbiljnih kratkih spojeva. Ovo je osnovni razlog za razvoj nelinearnih strategija.

Neke od nelinearnih strategija koje se koriste su "sliding mode" (SM), "high order sliding mode" (HOSM) i koriscenje generickih i fuzzy algoritama za modelovanje. Sve ove kontrolne strategije su se pokazale kao efikasne pri kontroli DFIM tokom nepredvidenih i nemodelovanih naponskih poremećaja smanjujući i mehanički stres na rotacione elemente vetroelektrane [22] [23] [24].

DISKUSIJA

U prethodnim glavama su predstavljene aktivne i pasivne FRT tehnike za DFIM. U ovoj glavi će biti dato kratko poređenje pomenutih tehnika navodeći prednosti i mane istih.

Pasivne metode imaju jako ograničene mogućnosti kada je reč o održavanju kontrole na DFIM tokom trajanja kratkog spoja, i imaju efekta pri jako malim padovima napona. Kratkospajanje rotorskih namotaja preko *crowbar-a* momentalno dovodi do gubitka kontrole, ali u potpunosti štiti konvertere na rotoru jer ih odvaja od visokih napona i struja. Prilikom gubitka kontrole DFIM povuče jako veliku reaktivnu snagu iz mreže pogotovo u slučaju veće otpornosti na rotoru. Ova povećana otpornost može da ima negativan efekat pri odvajanju dodatne otpornosti izazivajući ponovo visoke struje u DFIM. Ova pasivna metoda se koristi kao zaštita za sve ostale kako pasivne tako i aktivne u slučaju da kontrolne strategije podbace.

Aktivne metode za cilj imaju promenu kontrolne strategije konvertera kako bi se predupredili negativni efekti nagle promene napona usled kratkog spoja. Sve ove metode traže dodatnu i komplikovaniju kontrolnu strategiju, a dosta njih takođe zahteva dodatna ulaganju u opremu što povećava cenu celog sistema. Uprkos većoj ceni ove metode su se pokazale daleko efikasnije u odnosu na pasivne kada je reč o zadržavanju kontrolabilnosti DFIM. Takođe, napredne kontrolne strategije omogućavaju da se utiče na struje u DFIM tokom kratkog spoja kako bi se ispunila razna očekivanja kao što su snabdevanje mreže reaktivnom snagom, smanjenje mehaničkog naprezanja rotacionih elementa usled trzaja električnog momenta, kontrola fluksa u DFIM, kontrola vrednosti struja kratkog spoja DFIM.

U praksi se najčešće kao zaštita koristi *crowbar*, ekonomski najisplativija i najsigurnija jer u potpunosti štiti DFIM od kratkog spoja, ali najveći potencijal svakako predstavlja kombinacija FFTCC i *crowbar-a*, koji je tu kao pomoćna zaštita ukoliko struje i naponi kratkog spoja prevaziđu mogućnosti konvertera tokom aktivne zaštite. Potrebno je napomenuti da je ovo oblast u kojoj i dalje postoji mnogo potencijala za razvoj efikasnih i ekonomski isplativih zaštita, tako da odabir jedne nad drugom je i dalje nezahvalan. Ono što je sigurno je to da DFIM, koji zbog svoje operabilnosti tokom različitih brzina vetra i cene predstavljaju dominantne proizvodne jedinice u vetroelektranama, razvojem zaštita za FRT samo povećavaju svoju privlačnost za ugradnju kao proizvodnih jedinica.

ZAKLJUČAK

Udeo vetroelektrana sa DFIM kao proizvodnim jedinicama stalno raste i u pojedinim elektroenergetskim sistemima je dovoljno veliki da ima veliki uticaj na stabilnost sistema. Zbog svoje prirode DFIM su jako osetljive na nagle promene napona (kratke spojeve), koje mogu da dovedu do velikih oštećenja skupih elemenata energetske elektronike koji se koriste za upravljanje DFIM tokom rada. Savremene potrebe za stabilnim napajanjem električnom energijom dovele su do uvođenja FRT zahteva za DFIM, kao i do razvoja opreme i tehnika upravljanja DFIM koji omogućavaju isto. U ovom radu je dat pregled tehnika za FRT. Ovaj rad treba da predstavlja polaznu tačku za razvoj jedinstvenog modela DFIM tokom kratkog spoja, koji će na jednostavan način dovoljno dobro opisati DFIM tokom kratkog spoja i tako doprineti poboljšanju tačnosti rezultata proračuna kratkih spojeva.

LITERATURA

1. S. Bull, "Renewable energy today and tomorrow," Proc. IEEE, br. 8, str. 1216–1226, Avgust 2001
2. E. Camm, M. Behnke, O. Bolado, M. Bollen, M. Bradt, C. Brooks, W. Dilling, W. Hejduk, D. Houseman, S. Klein, F. Li, J. Li, P. Maiback, T. Nicolai, J. Patino, S. Pasupulati, N. Samaan, S. Saylor, T. Siebert, T. Smith, M. Starke, R. Walling, "Characteristics of Wind Turbine Generators for Wind Power Plants," IEEE PES General Meeting, 2009.
3. J. Morren, S. de Haan, "Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip," IEEE Trans. Energy Convers., br. 2, str. 435–441, Jun 2005.
4. J. Niiranen, "Voltage dip ride trough of a doubly-fed generator equipped with an active crowbar," Nordic Wind Power Conference NWPC 2004, Mart 2004.
5. M. Benbouzid, S.M. Mueen, F. Khouchal, "An Up-to-Date Review of Low-Voltage Ride-Through Techniques for Doubly-Fed Induction Generator-Based Wind Turbines," Int. J. Energy Convers. 2015

6. F. K. Luna, Lima De Araujo, D. Santos, P. Rodriguez, E.H. Watanabe and S. Arnaltes, "Simplified Modeling of a DFIG for Transient Studies in Wind Power Applications," IEEE Trans. Industrial Electronics, br. 1, str. 9-20, Januar 2011
7. A. Dittrich, A. Stoev, "Comparison of fault ride-through for wind turbines with DFIM generators," Proc. of the 11th European Conf. on Power Electronics and Applications, Septembar 11-14, 2005.
8. Federal Ministry for the Environment. *Ordinance on System Services by Wind Energy Plants (System Service Ordinance-SDLWindV)*; Nature Conservation and Nuclear Safety, Nemačka, 2009. <http://www.erneuerbareenergien.de>
9. I. Erlich, H. Wrede, C. Feltes, "Dynamic behavior of DFIG-based wind turbines during grid faults," Proc. of the 4th Power Conversion Conference, str. 1195-1200, April 2007.
10. A. D. Hansena, G. Michalke, "Fault ride-through capability of DFIG wind turbines," Renewable Energy, br. 9, str. 1594-1610, Jul 2007.
11. O. Noureldeen, and I. Hamdan, "A novel controllable crowbar based on fault type protection technique for DFIG wind energy conversion system using adaptive neuro-fuzzy inference system," Journal of Protection and Control of Modern Power Systems, br. 35, str. 1-12, 2018.
12. J. Liang; W. Qiao and R.G. Harley, "Feed-forward transient current control for low-voltage ride-through enhancement of DFIG wind turbines," IEEE Trans. Energy Conversion, br. 3, str. 836-843, Septembar 2010.
13. D. Xiang, L. Ran, P. J. Tavner, and S. Yang, "Control of a Doubly Fed Induction Generator in a Wind Turbine During Grid Fault Ride-Through," IEEE Transactions on energy conversion, br. 3, Septembar 2006.
14. J. Liang and R. G. Harley, "Feed-forward transient compensation control for dfig wind generators during both balanced and unbalanced grid disturbances," Proc. of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, str. 2389-2396, Septembar 2011.
15. J. López, E. Gubía, E. Olea, J. Ruiz and L. Marroyo, "Ride through of wind turbines with doubly fed induction generator under symmetrical voltage dips," IEEE Trans. Ind. Electron., br. 10, str. 4246-4254, Oktobar 2009.
16. S. Hu, X. Lin, Y. Kang and X. Zou, "An improved low-voltage ride-through control strategy of doubly fed induction generator during grid faults", IEEE Trans. Power Electron, br. 12, str. 3653-3665.
17. O. Abdel-Baqi and A. Nasiri, "A dynamic LVRT solution for doubly- fed induction generators," IEEE Trans. Power Electron., br. 1, str. 193-196, Januar 2010
18. P.S. Flannery and G. Venkataramanan, "A fault tolerant doubly fed induction generator wind turbine using a parallel grid side rectifier and series grid side converter," IEEE Trans. Power Electronics, br. 3, str. 1126-1135, Maj 2008.
19. P. S. Flannery and G. Venkataramanan, "A unified architecture for doubly fed induction generator wind turbines using a parallel grid side rectifier and series grid side converter," IEEE, str. 1442-1449, 2007.
20. I. Abdelsalam, G.P. Adam, D. Holliday and B.W. Williams, "Modified back-to-back current source converter and its application to wind energy conversion systems," IET Power Electron., 2014.
21. L. Yang, Z. Xu, J. Ostergaard, Z.Y. Dong and K.P. Wong, "Advanced control strategy of DFIG wind turbines for power system fault ride through," IEEE Trans. Power Systems, br. 2, str. 713-722, Maj 2012.
22. M.J. Hossain, H.R. Pota, V.A. Ugrinovskii and R.A. Ramos, "Simultaneous STATCOM and pitch angle control for improved LVRT capability of fixed-speed wind turbines," IEEE Trans. Sustainable Energy, br. 3, str. 142-151, Oktobar 2010.
23. T.D. Vrionis, X.I. Koutiva and N.A. Vovos, "A genetic algorithm- based low voltage ride-through control strategy for grid connected doubly fed induction wind generators," IEEE Trans. Power Systems, br. 3, str. 1325-1334, Maj 2014.
24. M.E.H. Benbouzid, B. Beltran, Y. Amirat, G. Yao, J. Han and H. Mangel, "Second-order sliding mode control for DFIG-based wind turbines fault ride-through capability enhancement," ISA Transactions, br. 3, str. 827-833, Maj 2014.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku elektroniku i telekomunikacije, u okviru realizacije projekta pod nazivom: "Razvoj i primena savremenih metoda u nastavi i istraživačkim aktivnostima na Departmanu za energetiku, elektroniku i telekomunikacije".

Autori se takođe zahvaljuju firmi Schneider Electric na podršci pri ovom istraživanju.